

# L'analyse lithosismique, une méthode de la sédimentologie

Sismique haute-résolution  
Faciès acoustiques  
Carottages  
Sédimentologie  
Corrélations

High resolution seismic profiling  
Acoustic facies  
Piston cores  
Sedimentology  
Correlations

H. GOT <sup>a</sup>, C. BOUYE <sup>a</sup>, L. MIRABILE <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie Marines, UA CNRS 715, Université de Perpignan, avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan, France.

<sup>b</sup> Istituto di Oceanologia, Istituto Universitario Navale, Naples, Italie.

Reçu le 20/1/86, révisé le 17/3/86, accepté le 8/4/86.

## RÉSUMÉ

La confrontation de la réponse sismique haute-résolution (fréquence de 100 à 5 000 Hz) et de la nature des dépôts silto-vaseux récents prélevés par carottage dans divers domaines marins et lacustres a permis d'établir les corrélations entre faciès acoustiques et paramètres granulométriques (pourcentage en fraction supérieure à 40 µm, médiane) et structurels (épaisseur et espacement des lits grossiers). Chacun des faciès acoustiques analysés (frustré, chaotique, stratifié, transparent) n'existe que pour une plage déterminée de valeurs des paramètres précédents. Ceci conduit à la définition des spectres lithosismiques qui établissent les domaines sédimentologiques d'existence des faciès acoustiques.

Le passage d'une réponse acoustique à l'autre est souvent progressif, et correspond à un recouvrement des plages de variation des paramètres sédimentologiques. La réponse sismique traduit donc bien l'évolution latérale progressive des faciès lithologiques.

Deux autres paramètres interviennent pour modifier les relations établies : d'une part, la texture du sédiment qui induit souvent des réponses particulières obéissant à des phénomènes de seuil physique; d'autre part, les caractéristiques du matériel mis en œuvre et notamment la fréquence d'émission ou de réception du signal. Ces deux causes de modification peuvent être éliminées par un processus méthodologique intégrant le jeu des profils sismiques dans des gammes de fréquences différentes.

Apparaît alors clairement la relation faciès acoustique — caractères sédimentologiques, dont la fiabilité permet de considérer la sismique haute-résolution comme un excellent outil pour la sédimentologie.

*Oceanol. Acta*, 1987, 10, 1, 1-13.

## ABSTRACT

### Lithoseismic analysis: a method for sedimentology

Comparison of high resolution seismic profiles (Sparker, Surfboom derived from Boomer) with piston cores in various sedimentary environments (deep sea fan; continental shelf, lacustrine) makes it possible to establish lithoseismic correlations. This involves on one hand, qualitative analyses of reflection (variations in reflection amplitude, frequency, continuity) resulting in the definition of acoustic facies (hummocky, chaotic, stratified, transparent), complemented by analyses of the geometry of reflectors (unconformities, stratal boundaries) leading to the definition of lithoseismic units, and on the other, the determination of sedimentological parameters (silt/sand content, mean grain size, thickness and spacing of coarse beds).

The acoustic response depends on these sedimentological factors. Thus, the evolution from the hummocky to the transparent facies, for example, is the result of a decrease in silt and sand content, a decrease of the mean grain size and a reduction of thickness of the silty-sandy beds simultaneous to an increase of their spacing. This dependence may be quantified by lithoseismic spectra, defined as the range of variation of each parameter needed for the development of a determined acoustic facies. Each of the latter displays a quite well individualized spectrum but some overlapping of the ranges of variation can be noted from one facies to another, creating what is interpreted as

an intermediate acoustic facies (e.g. transparent slightly stratified), indicating continuity of the evolution of the acoustic facies in response to the progressive lateral changes of the sedimentary facies.

The acoustic response is also dependent on textural characters of the sediment (presence of bubbles, reworked series) giving way to an apparent facies, superimposed to the response normally related to the sedimentological parameters. These textural characters induce rapid lateral changes of the acoustic facies (threshold boundaries) which cannot be related to sedimentological variations.

Frequency of seismic pulse also should be taken into account; it may produce variations in response: low frequencies better define the geometry of the seismic units while high frequencies emphasize sedimentological differences. Thus, they appear to be complementary.

Two degrees of correlation are established: 1) reliable, when a specific sediment type always correspond to the same acoustic facies whatever the seismic device used; 2) variable, when a sediment type may appear differently in the seismic profiles or when two different sediment types give way to an identical acoustic response. These uncertainties of converging acoustic facies can be minimized by replaying the profiles in successive frequency ranges.

In spite of the differences between seismic and sedimentological scales of the studied silty-sandy pelitic sediments, lithoseismic analyse appears to be a useful method when following an operating process including detailed seismic facies analyse, geometric studies and a comparison of the preceding characters in various frequency ranges.

*Oceanol. Acta*, 1987, 10, 1, 1-13.

## INTRODUCTION

Sous l'impulsion des recherches marines, notamment dans la géologie du pétrole, la stratigraphie acoustique a connu d'importants progrès au cours des années récentes, dont une grande partie est synthétisée dans les ouvrages : « Seismic Stratigraphy I » de Payton (1977) et « II » de Berg et Woolverton (1985).

L'exemple le plus connu en Méditerranée est, depuis les travaux de Ryan *et al.* (1970), la différenciation sismique du remplissage plio-quadernaire du bassin en un ensemble transparent correspondant à des dépôts pliocènes hémipélagiques surmonté par un ensemble statifié, quadernaire, turbiditique.

Toutefois, ces travaux se situent souvent dans des échelles compatibles avec les données techniques : sismique à forte pénétration mais de résolution médiocre, corrélation avec la lithologie globale des carottages de type industriel. Notre propos est d'établir les corrélations existant entre la réponse acoustique de la prospection sismique haute-résolution et les paramètres sédimentologiques des dépôts meubles récents.

La démarche est classique : le faciès sismique d'une séquence dépend directement des variations d'impédance (produit de la vitesse de propagation par la densité) aux interfaces des milieux, mais aussi de l'absorption de l'onde acoustique à la traversée de ces milieux.

Les sédiments meubles ne sont pas isotropes ; des irrégularités de texture et de structure sont introduites par la disposition en agrégats de grains et d'interstices remplis d'eau ou d'autres fluides (gaz). Il en résulte que la vitesse de propagation est fonction de nombreux paramètres tels que la porosité (Hamilton, 1970 ;

Schirmer, 1971), la densité humide (Hamilton, 1976 ; Shumway, 1960 ; Biarrez, Rudelle, 1977), les paramètres géotechniques (cohésion, limites d'Atterberg et indice de compressibilité) et la granulométrie (Hamilton, 1970 ; 1974 ; Anderson, Hampton, 1974 ; Longuemard, Duboul-Razavet, 1980).

Ces corrélations ont été établies par des acousticiens, hors du contexte naturel et souvent dans des gammes de fréquence bien déterminées, alors que les moyens sismiques sont caractérisés par des larges bandes de fréquence. Nous avons donc tenté d'établir des corrélations entre la réponse sismique et les qualités du sédiment prélevé.

## MÉTHODOLOGIE

Le matériel sismique mis en œuvre est de type haute-résolution ; il comprend :

- Une source Sparker, assurant des puissances de 1 000 à 3 000 joules dans un spectre de fréquence de 100 à 600 Hz, permettant des pénétrations de 800 ms à 1 sec., pour une résolution de l'ordre de 12 à 15 ms.
- Une source « Surfboom » mis au point par l'IUN NAPLES, dérivé du Boomer et permettant, sous 1 000 joules d'obtenir, 200 à 300 ms de pénétration, pour une résolution de 5 à 2 ms (fig. 1) dans une gamme de fréquence de 200 à 5 000 Hz.

Dans les deux cas, le signal a été enregistré sur bande magnétique et soumis à des rejeux ultérieurs dans différentes bandes de fréquence.

- Par ailleurs, dans de nombreux cas, la couverture sismique est doublée par une couverture au sondeur de sédiment 3,5 Hz ou 12 kHz.

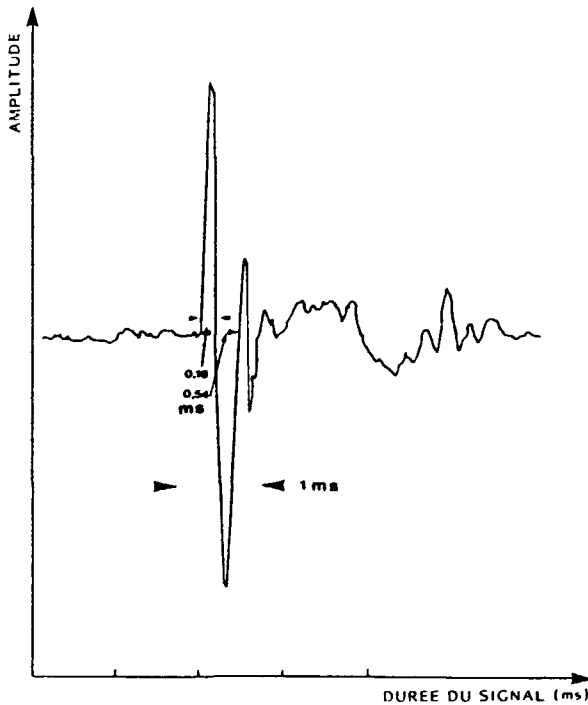


Figure 1  
Signal du Surfboom.  
Surfboom pulse.

En outre, pour l'une des zones d'étude (éventail sous-marin du Rhône), nous avons pu utiliser une source canon à air de 40 c.i., de plus basse fréquence et de résolution médiocre, qui situe ce matériel hors des limites de la haute-résolution.

Le prélèvement de sédiment a été effectué par carottage à piston, dans la plupart des cas un carottier de type Kullenberg, les épaisseurs prélevées étant 10 m au maximum.

Les carottes ont été soumises aux analyses suivantes : lithologie, densimétrie ; pourcentage d'éléments de taille supérieure à 40  $\mu\text{m}$  ; granulométrie ; épaisseur et espacement des niveaux silto-sableux.

Afin de diversifier les données, trois types de milieux à sédimentation hétérogène ont été étudiés (fig. 2) :

- les éventails profonds (deep sea fans) du Rhône et de l'Ebre ;
- le plateau continental de l'Ebre ;
- le barrage de Castillon (Alpes de Haute Provence).

Des données complémentaires sur le Golfe du Lion (Aloisi *et al.*, 1975 ; Got *et al.*, 1985) sont également utilisées.

## ANALYSE SISMIQUE

L'analyse sismique est basée sur deux types d'études :

- le caractère de la réflexion, défini par son amplitude, sa fréquence, le nombre de phases, sa signature (Leenhardt, 1972) ;
- la géométrie des réflecteurs.

Le caractère de la réflexion permet d'aboutir à la définition du faciès sismique correspondant à l'ensemble des

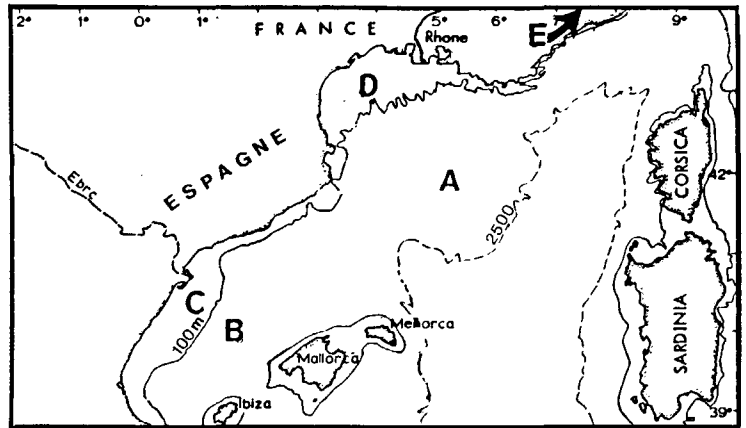


Figure 2  
Localisation des zones d'études.  
A : Éventail sous-marin profond du Rhône.  
B : Éventail sous-marin profond de l'Ebre.  
C : Plateau continental de l'Ebre.  
D : Plateau continental du Golfe du Lion.  
E : Barrage de Castillon.  
Location of the studied areas.

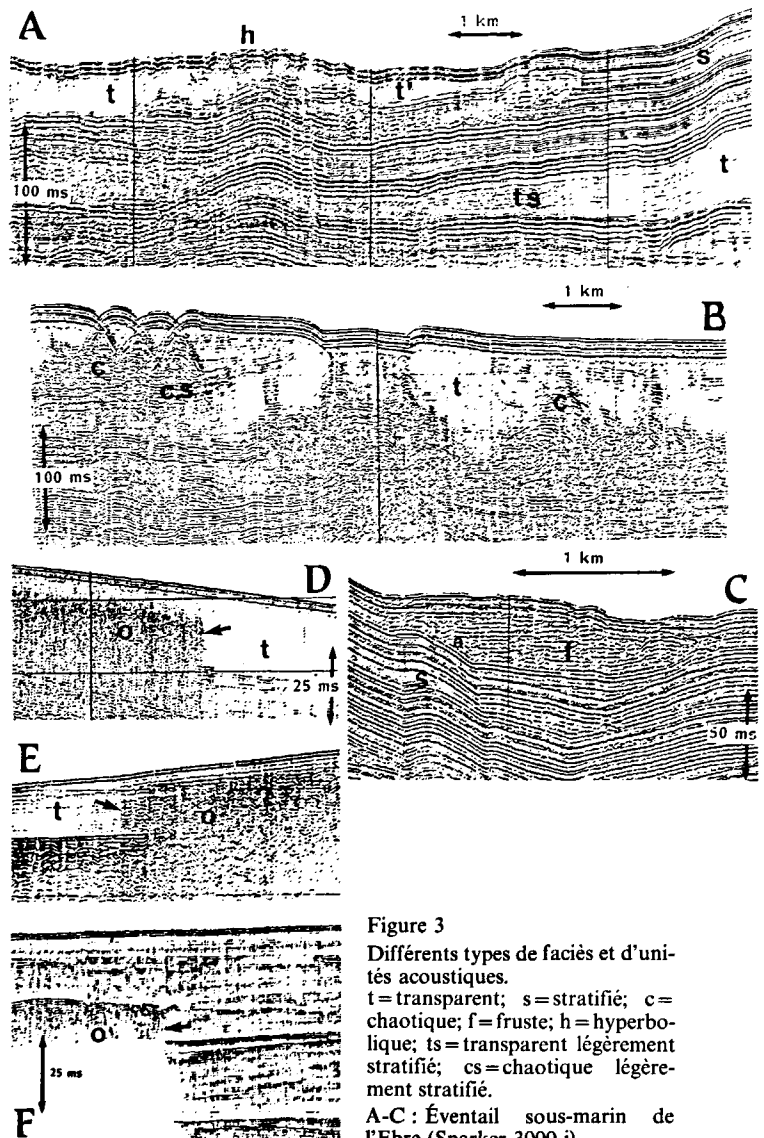


Figure 3  
Différents types de faciès et d'unités acoustiques.  
t = transparent ; s = stratifié ; c = chaotique ; f = fruste ; h = hyperbolique ; ts = transparent légèrement stratifié ; cs = chaotique légèrement stratifié.  
A-C : Éventail sous-marin de l'Ebre (Sparker 3000 j).

B : Éventail sous-marin du Rhône (Sparker 3000 j).  
D-E-F : Phénomènes d'occultation de la réponse acoustique (0) du plateau continental de l'Ebre (Surfboom 1000 j).  
Various types of acoustic facies and units.

caractères d'un groupe, relativement homogène, de réflexions internes liées à un même ensemble sédimentaire.

Mitchum *et al.* (1977) distinguent plusieurs types de faciès sismiques, que nous illustrons à l'aide d'exemples pris dans les sédiments meubles des diverses zones étudiées.

### Le faciès lité ou stratifié

Ce faciès sismique (S, fig. 3 A et 3 C) se caractérise par une séquence de réflecteurs parallèles, d'amplitude et de fréquence variables, mais montrant une continuité en général bonne.

Les faciès stratifiés sont courants dans les divers domaines étudiés et correspondent généralement à des ensembles globalement vaseux, intercalés de lits silteux ou sableux (fig. 4 E, F).

### Le faciès transparent

Ce type de faciès (t, fig. 3) se caractérise par l'absence de réflecteur, ou par des réflecteurs de très faible amplitude dont la continuité est généralement assez faible.

Cette configuration apparaît le plus souvent dans les séries sédimentaires récentes, peu compactées, vaseuses et homogènes : recouvrement holocène des plateaux continentaux (fig. 4 D) : levées des zones distales des deep sea fans (t, fig. 3 A, B). Mais elle se retrouve

aussi dans des séries sédimentaires affectées par des phénomènes d'écoulements gravitaires (Mear, 1984; Coutellier, 1985) au niveau des pentes et du talus (t, fig. 3 A et fig. 10).

Ce faciès semble donc correspondre à des séries dépourvues de stratification soit au cours du dépôt, soit par suite de remaniements.

### Le faciès chaotique

Le faciès sismique est constitué par un groupe de petites réflexions discontinues, souvent enchevêtrées et hyperboliques, dont l'amplitude est variable mais fréquemment forte (c, fig. 3 B). Une faible stratification (c.s., fig. 3 B) est parfois reconnaissable en surimposition.

Nous interprétons cette configuration, d'extension latérale toujours limitée, comme la traduction d'un sédiment hétérogène et grossier, très fréquemment lié à des remplissages de chenaux, notamment au niveau des éventails sédimentaires sous-marins où elle présente souvent une forme en pagode (fig. 3 B).

### La configuration « hummocky » ou faciès fruste

La réponse sismique (fig. 3 C), très voisine de la précédente, en diffère une absence totale de continuité des réflecteurs et de brusques variations latérales d'amplitude (Ravenne, 1978).

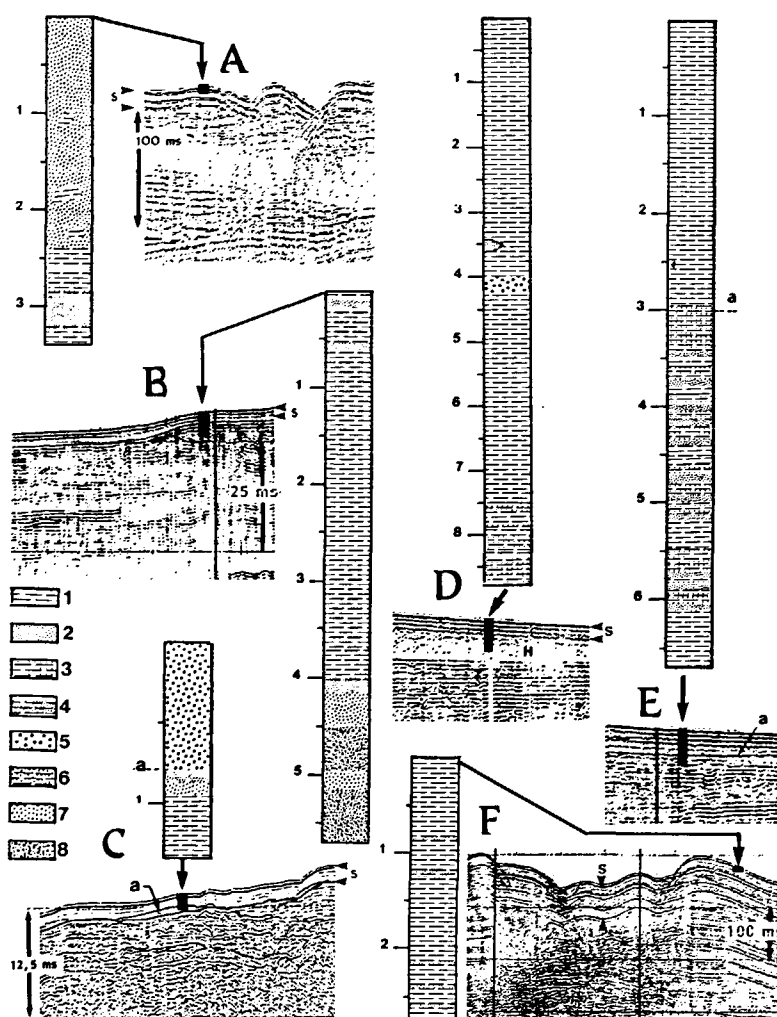


Figure 4

Comparaison carottages-réponse sismique.

Légende lithologique : 1 = vase ; 2 = silt ; 3 = vase vaseuse ; 4 = silt vaseux ; 5 = vase à bulles ; 6 = sable vaseux ; 7 = sable ; 8 = gravier.

A : Carotte de sable dans un faciès acoustique fruste (profil Sparker 3000 J, s = épaisseur du signal).

B : Carotte de vase au sommet et de sable à la base recoupant un faciès transparent superposé à un faciès stratifié légèrement chaotique (profil Surfboom 1000 J).

C : Carotte dans le signal du Surfboom (100 j) mais présentant un fort réflecteur (a) qui traverse le signal.

D : Carotte de vases dans un faciès transparent.

E : Carotte de vase intercalée de silts correspondant au faciès stratifié.

F : Carotte de vases silteuses dans le signal de l'Air-Gun auquel se surimpose le faciès stratifié sous-jacent.

*Correlations between piston cores and seismic response.*

La disposition irrégulière des réflecteurs ainsi que les variations importantes tant de l'amplitude que de la continuité confirment la correspondance de cette réponse aux ensembles sédimentaires hétérogènes à dominance sableuse carottés (fig. 4 A).

### Le faciès hyperbolique

Ce faciès (h, fig. 3 A) est caractérisé par une série d'hyperboles dont les branches se chevauchent. Fréquemment situé au sommet des unités sédimentaires, il indique des irrégularités ou des ondulations dont la taille est équivalente ou inférieure à la longueur d'onde. Ces faciès sont couramment développés sur les pentes continentales (Got *et al.*, 1979; Canals-Artigas, 1985).

Autour de ces types de faciès de base, on peut reconnaître toute une série de faciès intermédiaires, associant de façon plus ou moins évidente les caractéristiques des faciès voisins. Ainsi notre étude nous a amené à décrire par exemple des faciès chaotiques légèrement stratifiés (C.S, fig. 3 B) ou encore transparents localement stratifiés (t.s, fig. 3 A), avec un passage latéral progressif.

A cette différenciation de faciès établie par Mitchum *et al.* (1977), il convient d'ajouter le *faciès sourd* caractérisé par une forte absorption de l'énergie selon un plan parallèle à la stratification, qui entraîne une occultation des réflexions sous-jacentes. La limite supérieure du faciès est marquée soit par un réflecteur à fort coefficient de réflexion (fig. 3 F) soit par une surface irrégulière (fig. 3 E) ou mal définie (fig. 3 D).

Dans les séries sédimentaires meubles, la seconde caractéristique du faciès sourd est la brutalité de ses limites latérales (flèches sur fig. 3 D, E, F), qui contraste avec la continuité d'évolution entre les quatre réponses acoustiques précédentes. Ce faciès sourd a été décrit sous le terme de « faciès de table » (Chassefière *et al.*, 1974; Aloisi *et al.*, 1975).

A la définition de faciès acoustique se surimpose celle d'unité sismique. Celle-ci est définie par ses relations géométriques avec les unités voisines, sus-jacentes, sous-jacentes et latérales.

En ce qui concerne les limites supérieures et inférieures, Mitchum *et al.* (1977) distinguent les terminaisons des strates situées soit à la base, soit au sommet d'une unité sismique.

#### ● Terminaisons à la base : (« base-lap »)

Les strates considérées sont celles venant en contact avec l'unité inférieure. On distingue deux types principaux de contacts discordants : 1) *terminaison en « on-lap »* : terminaison d'un horizon supérieur horizontal ou incliné contre une surface inférieure plus inclinée (a, fig. 3 C); 2) *terminaison en « down-lap »*; ce terme désigne la terminaison latérale d'un horizon incliné sur une surface horizontale ou moins inclinée.

#### ● Terminaison au toit de l'unité : (« top-lap »)

Les strates viennent en contact avec l'unité supérieure qui apparaît souvent discordante.

Quant aux limites latérales elles sont de deux types : progressives par évolution lente d'un faciès acoustique

à l'autre ou au contraire brutales, avec une juxtaposition de deux faciès différenciés, l'un des deux étant dans la plupart des cas le faciès sourd.

Une unité sismique est donc un ensemble de faciès géométriquement bien individualisé. Deux exemples illustrent cette définition :

- Les lobes des éventails sous-marins (fig. 3 A) correspondant à une unité de forme prismatique, dont le centre est constitué par un faciès chaotique encadré par des unités transparentes puis stratifiées ou transparentes légèrement stratifiées vers les zones distales (Aloisi *et al.*, 1981).

- Le prisme sédimentaire épicontinental des plateaux continentaux (Aloisi *et al.*, 1975), dont la réponse acoustique évolue du faciès fruste au faciès transparent, de la côte vers le large.

L'analyse sismique requiert donc une étude exhaustive du caractère de la réflexion et une analyse géométrique détaillée. Elle est un préalable à l'analyse lithosismique qui consiste à identifier les faciès acoustiques à une nature de sédiment.

Cette possibilité d'identification directe est basée sur l'étude des corrélations établies entre les réponses acoustiques et la nature sédimentologique des dépôts.

## CORRÉLATIONS LITHOSISMQUES

Plusieurs faciès sismiques et unités lithosismiques ont été définis dans les divers domaines étudiés.

Ces ensembles ont été systématiquement carottés afin de déterminer la nature des sédiments. Nous ne traiterons pas ici du faciès hyperbolique, antérieurement étudié (Got *et al.*, 1979), et dont l'origine n'est pas directement dépendante de la nature ou de la structure du sédiment puisque la réponse acoustique est généralement liée à l'existence d'irrégularités de surface induites par des phénomènes gravitaires, liées en partie au gradient de pente.

### Corrélation avec la granulométrie

L'importance de ce critère est à la fois évidente et bien connue depuis les travaux d'Hamilton (1970); la teneur en éléments sableux agit sur la vitesse de propagation des ondes par l'intermédiaire des variations de densité et de porosité.

Notre étude permet de dépasser ce stade de la relation. Le report des types de réponse acoustique sur un diagramme pourcentage de fraction supérieure à 40  $\mu\text{m}$  par rapport à la médiane moyenne par carotte (fig. 5) fait apparaître les grandes familles de faciès : les faciès transparents pour des valeurs de médianes inférieures à 4  $\mu\text{m}$  et des pourcentages allant de 0 à 50 %, les faciès stratifiés jusqu'à 12  $\mu\text{m}$  et 70 % et au-delà des valeurs précédentes, les faciès chaotiques et frustes.

La taille des grains de la fraction sableuse apparaît donc comme un critère lithosismique complémentaire de la notion de sédiment vaseux ou sableux.

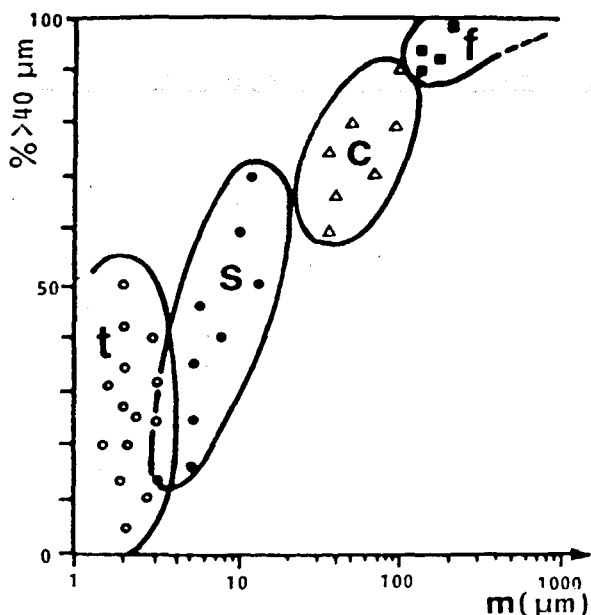


Figure 5  
Corrélation entre le pourcentage moyen par carotte de fraction supérieure à 40 μm et la médiane moyenne (m).  
t = transparent; s = stratifié; c = chaotique; f = fruste.  
Correlation between silt and sand content versus mean grain size (m).

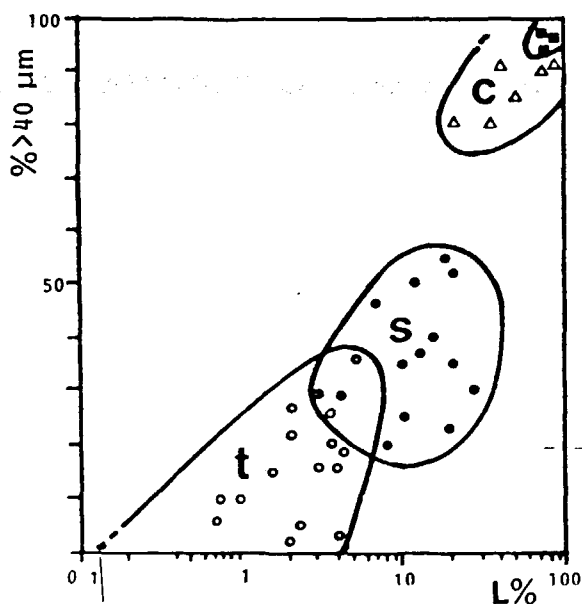


Figure 6  
Corrélation entre le pourcentage de fraction supérieure à 40 μm et le rapport L de l'épaisseur des lits silto-sableux à l'épaisseur totale, en pourcentage.  
Correlation between the >40 μm percentage and L%, ratio of the thickness of silty sandy beds versus total thickness.

### CORRÉLATION AVEC LA DISPOSITION DES LITS

Les lois de la réflexion des ondes acoustiques établissent que celle-ci ne peut se produire que lorsque existe une interface entre deux milieux d'impédance différente, c'est-à-dire de vitesse et de densité différentes, elles-mêmes déterminées par notamment la nature du sédiment. L'on conçoit dès lors que la seule notion de taille des grains est insuffisante : en effet, un sédiment aura une réponse différente selon que la fraction sableuse qui la constitue sera dispersée dans la fraction fine ou au contraire sera regroupée en lits individualisés donnant naissance à des interfaces. Nous avons donc intégré à l'étude des corrélations lithosismiques, le mode de répartition de la fraction supérieure à 40 μm dans le sédiment.

Ce mode de répartition est quantifié par le rapport L entre l'épaisseur des lits silto-sableux et l'épaisseur totale, ramené en pourcentage. Le diagramme pourcentage-fraction >40 μm par rapport à L montre la relation évidente entre les deux paramètres (fig. 6). Il établit par ailleurs une répartition différenciée des faciès acoustiques depuis les réponses transparentes correspondant à des sédiments silto-vaseux pour lesquels L reste inférieur à 6% jusqu'aux faciès chaotiques et frustes correspondant à des sédiments à plus de 70% de fraction silto-sableuse, la proportion des lits étant supérieure à 20%.

Toutefois, l'abondance des lits sableux traduit encore imparfaitement le litage du sédiment puisqu'il ne prend pas en compte leur valeur absolue. Un diagramme des valeurs des épaisseurs des lits (e) par rapport à leur espacement (E) a donc été établi (fig. 7); il individualise

de façon nette les quatre faciès acoustiques, qui occupent des aires bien déterminées. Ces aires ne sont cependant pas totalement circonscrites; elles restent ouvertes pour des valeurs d'épaisseur et d'espacement situées hors des limites mesurées (millimétriques à pluridécimétriques). Ainsi le faciès transparent continue de se développer au-delà des valeurs mesurées, pour des épaisseurs de lits décroissantes et des espacements croissants, en direction des vases homogènes; à l'opposé, le faciès fruste se développe vers les sables purs.

La stratification apparaît donc comme étant, au même titre ou plus encore que les critères granulométriques, un paramètre déterminant de la réponse acoustique.

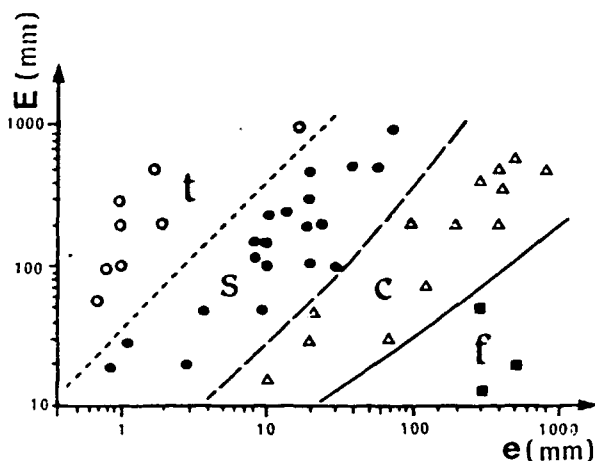


Figure 7  
Corrélation entre l'épaisseur des lits silto-sableux (e) et leur espacement (E).  
Correlation between the thickness of silty-sandy beds (e) and their spacing (E).

## NOTION DE SPECTRE LITHOSISMIQUE

Il apparaît donc que la réponse acoustique peut être mise en correspondance avec quatre paramètres dominants : teneur en fraction  $> 40 \mu\text{m}$ , médiane moyenne du sédiment dont les variations dépendent de la taille et de l'abondance des éléments sableux, épaisseur et espacement des lits silto-sableux.

Le report des intervalles de variation des valeurs de chacun de ces paramètres selon les faciès acoustiques (fig. 8) conduit à la notion de spectre lithosismique, que l'on peut définir comme la représentation graphique de l'intervalle de variation des valeurs de chaque paramètre, à l'intérieur duquel le sédiment montre une réponse acoustique déterminée. Notons que la visualisation graphique de ces spectres est déterminée par le choix des échelles, et qu'en particulier l'adoption d'échelles logarithmiques, qui facilite la représentation des paramètres de valeur très variable, entraîne une distorsion considérable des intervalles de variation.

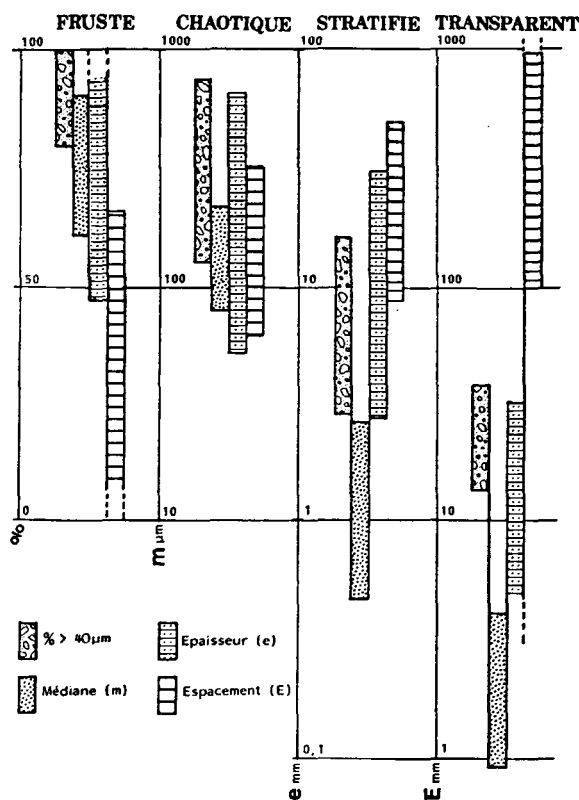


Figure 8

Spectres lithosismiques : intervalles de variation des paramètres sédimentologiques dans lesquels peuvent se développer les faciès acoustiques analysés. Chaque échelle est spécifique du paramètre indiqué (% , m, e, E) et concerne les quatre faciès.

*Lithoseismic spectra: successive variation ranges of the sedimentological parameters needed for the development of the studied acoustic facies.*

*Vertical scales are specific to each parameter (% , m, e, E) and concern the four facies.*

L'analyse des spectres lithosismiques permet de donner une définition sédimentologique aux faciès acoustiques :

— le faciès fruste correspond à des sédiments caractérisés par de fortes valeurs de tous les paramètres, à l'exception de l'espacement des niveaux grossiers ;

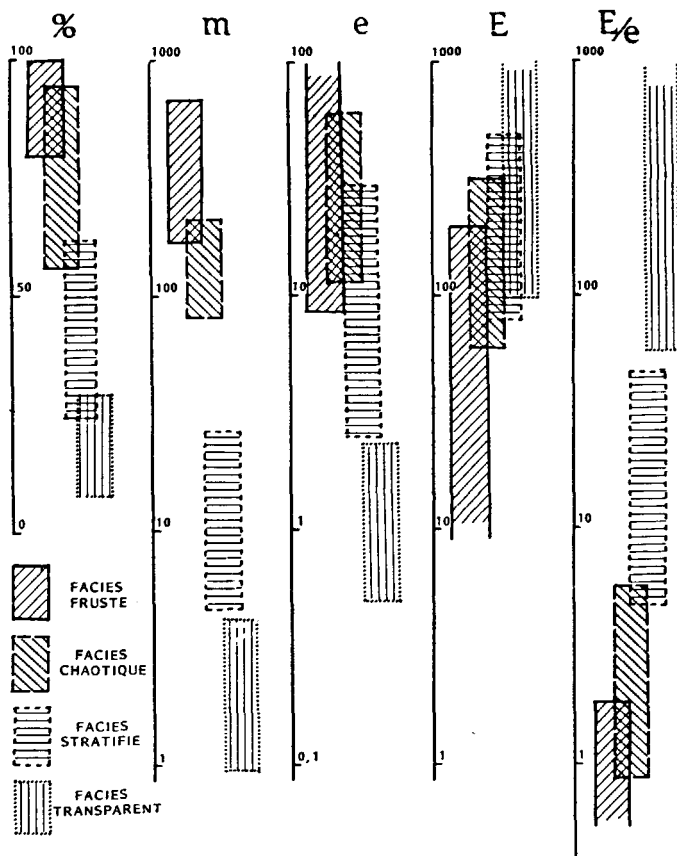


Figure 9

Échelonnement et recouvrement des intervalles de variation de chaque paramètre sédimentologique, d'un faciès acoustique à l'autre.

*Spreading and overlapping of the ranges of variation of the sedimentological parameters from one acoustic facies to another.*

celui-ci reste du même ordre de grandeur ou inférieur à leur épaisseur ;

— le faciès chaotique possède un spectre lithosismique très voisin du précédent, mais plus compact, par suite d'une augmentation de l'espacement des lits qui devient supérieur à l'épaisseur d'un facteur 5 ;

— le faciès stratifié apparaît beaucoup mieux différencié. Il se marque par une diminution de la teneur des éléments  $> 40 \mu\text{m}$ , un affinement important du grain (facteur 10), une diminution de l'épaisseur des lits corrélatrice d'une augmentation de leur espacement. Cette différenciation entraîne, dans le cadre des échelles adoptées, une disjonction des domaines d'extension des paramètres sédimentologiques ;

— le faciès transparent montre une accentuation de l'évolution précédente, les aires d'extension des intervalles de variation de chaque paramètre apparaissant totalement discontinues ; la médiane s'affine encore d'un facteur 10, les lits silteux deviennent millimétriques ou inférieurs au millimètre, alors que l'espacement est au moins décimétrique à métrique.

Malgré la bonne individualisation sédimentologique des faciès acoustiques, certaines valeurs des paramètres se recourent (fig. 9).

● Le pourcentage en fraction supérieure à  $40 \mu\text{m}$  montre un recouvrement important entre faciès fruste et chaotique.

● La médiane moyenne est nettement individualisée.

● L'épaisseur montre trois recouvrements importants entre les faciès fruste-chaotique, chaotique-stratifié et même fruste-stratifié.

● Les valeurs d'espacement sont communes, pour près de 50%, entre les faciès chaotique-stratifié et stratifié-transparent, et à un degré moindre pour fruste-chaotique.

En fait, les recouvrements des deux paramètres du litage traduisent mal leur action. En effet ils évoluent de façon opposée, et si l'on considère le rapport E/e, l'individualisation des réponses acoustiques apparaît de façon nette, le seul chevauchement des valeurs affectant les faciès fruste et chaotique.

L'analyse de ces résultats conduit à deux conclusions :

● Les faciès à caractères sismiques les plus proches correspondent aux sédiments montrant le plus de valeurs communes des paramètres sédimentologiques. C'est le cas des faciès fruste et chaotique, pour lesquels les recouvrements affectent tous les paramètres. Ce chevauchement des valeurs peut être interprété comme étant à l'origine des faciès mixtes; il traduit la correspondance entre variations sédimentologiques et évolution de la réponse acoustique.

● S'agissant du classement des facteurs déterminants de la réponse acoustique, il y a lieu de distinguer :

— des paramètres de discrimination, qui présentent le moins de valeurs de recouvrement et qui nécessitent le plus fort coefficient de variation pour passer d'un faciès à l'autre. La médiane est à ce titre illustrative, avec un coefficient 10 entre chaque faciès, depuis le transparent jusqu'au fruste. C'est également le cas du rapport espacement/épaisseur qui, à l'inverse, est successivement affecté d'un facteur 5 du faciès fruste au chaotique, puis 10 du chaotique au stratifié et 10 encore du stratifié au transparent;

— des paramètres de continuité qui répondent aux critères opposés et dont la teneur en éléments silto-sableux en est l'exemple.

La convergence des faciès s'atténue donc depuis le faciès fruste jusqu'au faciès transparent, sans pour cela exclure l'existence de réponses intermédiaires : stratifié légèrement chaotique ou encore transparent légèrement stratifié (fig. 3 A, B).

En résumé, on peut donc conclure qu'à chacun des types de réponse correspond une nature de sédiment définie par la teneur en fraction supérieure à 40 µm, le diamètre des grains, l'épaisseur et l'espacement des lits silto-sableux.

● Le faciès fruste correspond à des sédiments à plus de 80% de fraction grossière, sablo-graveleuse, répartie en lits centimétriques à pluri-décimétriques, à espacement inférieur ou égal au décimètre, le rapport des espacements aux épaisseurs restant voisin ou inférieur à 1.

● Le faciès chaotique transcrit des sédiments de médiane moyenne voisine de 0,1 mm, à teneur en fraction > 40 µm comprise entre 55 et 90%, distribuée en lits épais de 5 cm environ, espacés de quelques centimètres, E/e étant dans un rapport 0,6 à 5.

● Le faciès stratifié traduit des sédiments de médiane voisine de 10 µm, à teneur en fraction > 40 µm

comprise entre 20 et 60%, disposée en lits d'épaisseur 0,2 à 2 cm, espacés de 10 à 20 cm, dans un rapport E/e compris entre 5 et 50.

● Le faciès transparent correspond à des sédiments vaseux ou silto-vaseux de médiane inférieure à 5 µm, à moins de 30% de fraction supérieure à 40 µm, avec des lits millimétriques espacés de plus de 10 cm, le rapport des espacements aux épaisseurs devenant supérieur à 100.

## DISCUSSION

Si l'interprétation des données s'arrêtait à ce point, l'analyse lithosismique pourrait être considérée comme une méthode directement utilisable en sédimentologie.

Toutefois, la réponse acoustique peut être légèrement modifiée ou même totalement altérée par l'action de deux autres facteurs, l'un lié à la nature du sédiment, l'autre dépendant des caractéristiques techniques du matériel mis en œuvre. Par ailleurs, la validité est soumise au problème de la différence des échelles d'observation.

### Facteurs lithologiques

Certaines réponses acoustiques, notamment les réponses sourdes et transparentes, peuvent apparaître localement au sein de faciès homogènes répondant normalement aux paramètres sédimentologiques, sans que la modification de la réponse corresponde à une variation des paramètres précédents.

Deux exemples sont particulièrement illustratifs :

a) le phénomène d'écran acoustique : rappelons qu'il s'agit du développement brutal d'un faciès acoustique sourd au sein d'une unité sédimentaire généralement transparente ou légèrement stratifiée.

● Dans le cas du « faciès de table » à limite supérieure diffuse (fig. 3 D, E), le sédiment vaseux se caractérise au niveau de la modification de la réponse acoustique, par la seule présence de bulles de méthane (Ballester *et al.*, 1980) qui se traduit par une diminution nette de la densité humide, des valeurs de compressibilité importantes, une courbe de tassement par paliers représentant les phases successives de dégazage.

Des études de ce phénomène, reconnu ailleurs (Siddique *et al.*, 1981; Colantoni *et al.*, 1981; Got *et al.*, 1985), ont montré qu'une variation peu importante (1%) de la teneur en gaz du sédiment peut provoquer une forte variation (80%) de la vitesse de propagation (Lacaze, 1976; Biarrez, Rudelle, 1977). Ceci explique que l'apparition du faciès soit brutale.

Cette réponse est liée, non seulement à la quantité globale de gaz, mais aussi à la taille et à l'espacement des bulles au niveau desquelles, par suite de la différence de vitesse de propagation entre gaz et matière solide, l'énergie se disperse sous forme de chaleur.

● Dans le cas du faciès à limite supérieure marquée par un horizon à fort coefficient de réflexion (fig. 3 F), les sédiments associés sont constitués de sables grossiers,



graviers et galets, témoins, au niveau du plateau continental de l'Ebre, de cordons littoraux fossiles. L'effet d'écran acoustique résulte alors de l'hétérogénéité des éléments du sédiment et de leur taille; ces caractères lithologiques rendent compte du fort coefficient de réflexion et de l'apparition de l'effet de seuil de sa limite latérale.

b) les séquences remobilisées : certaines zones des éventails sous-marins présentent une réponse transparente (fig. 10), alors que l'étude sédimentologique (Mear, 1984) ne permet pas de différencier les sédiments de ces zones (carotte 08) de ceux des levées voisines stratifiées (carotte 07). En outre, au sein de cette série transparente, la stratification réapparaît avec une extension très limitée, mais en prolongement de la stratification des séquences contiguës.

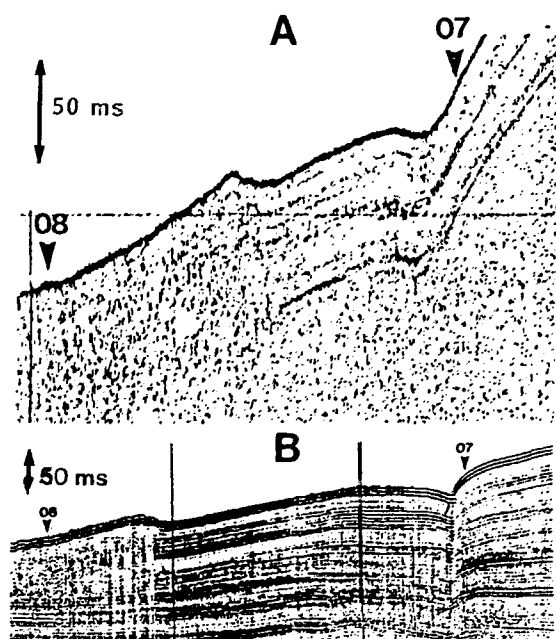


Figure 10  
Passage brutal d'un faciès stratifié à un faciès transparent dû à une remobilisation sédimentaire. A = profil 3,5 KHz et B = Sparker 3000 J de l'éventail sous-marin du Rhône; 07 et 08 : carottes.  
*Rapid evolution from a stratified to a transparent facies due to reworking phenomena. A = 3,5 KHz profile; B = 3000 j Sparker profile from the Rhône deep sea fan; 07 and 08: piston-core positions.*

Ceci amène à penser que l'absence de stratification acoustique n'est imputable ni à un changement lithologique, ni à un remaniement total de la séquence sédimentaire, mais pourrait être induite par l'existence de multiples microfractures, dont l'effet est de créer une plus grande porosité qui neutralise les variations d'impédance acoustique. Ces microfractures se répercutent jusqu'en surface, entraînant une déformation du signal du fond (faciès hyperbolique).

Certains paramètres liés à la texture sédimentaire (présence de gaz, microfractures) peuvent donc devenir prédominants et oblitérer localement les réponses acoustiques, sans que cette modification puisse être corrélée à des variations sédimentologiques. L'apparition de ces modifications se marque toujours par un effet de seuil physique.

### Facteurs instrumentaux

La multiplicité des sources sismiques utilisées entraîne une diversité des conditions expérimentales et des caractéristiques techniques.

Au travers de notre étude, il apparaît que la fréquence du signal émis et reçu est le paramètre déterminant. Son action s'exerce de deux façons :

- La fréquence agit sur l'absorption différentielle des ondes acoustiques. Des travaux expérimentaux (Hamilton, 1974) indiquent que celle-ci est approximativement proportionnelle à la fréquence. Mizikos (1972) établit que le coefficient d'absorption  $\alpha = K F^n$ , avec le  $1 \leq n \leq 2$  pour les sédiments argilo-sableux. Il est évident que ce coefficient dépend par ailleurs de la nature et de l'épaisseur du sédiment (Chassefière *et al.*, 1974; Lacaze, 1976).

- La fréquence détermine également le pouvoir de résolution. Ainsi, le filtrage dans les hautes fréquences revient à déplacer le spectre fréquentiel vers des valeurs élevées, donc de courte longueur d'onde, entraînant

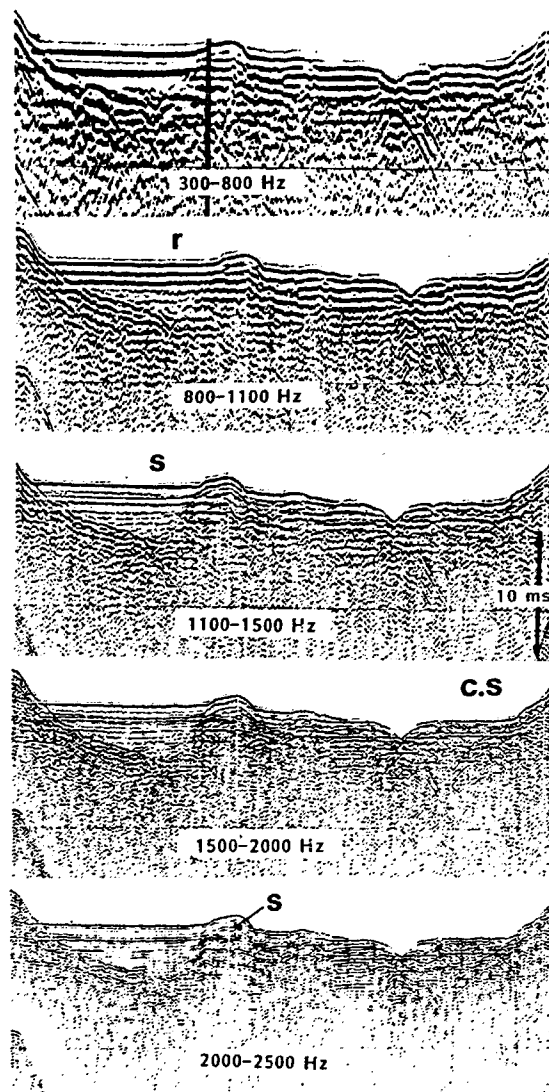


Figure 11  
Rejeu dans des gammes de fréquence échelonnées d'un profil Surfboom 100 j (lac de Castillon).  
Noter les différenciations successives du remplissage (r), de sa stratification (s) puis de la réponse chaotique légèrement stratifiée (c.s.).  
*Replay of a 100 j surfboom (lake of Castillon) in successive frequency ranges.*

une meilleure résolution. Le filtrage dans les basses fréquences produit les effets inverses.

Ce paramètre technique peut donc modifier de façon sensible la réponse acoustique. Afin de déterminer son rôle dans l'établissement des corrélations lithosismiques, nous avons, utilisant la large bande de fréquence du matériel mis en œuvre (de 100 à 5 000 Hz), effectué une série de rejeux d'un même faciès dans des gammes différentes. La figure 11 présente les variations de réponse acoustique d'un même profil sismique, rejoué selon cinq plages de fréquences échelonnées. Dans les gammes de basses fréquences, l'épaisseur du signal et sa réverbération occultent presque totalement la réponse acoustique. A mesure que la fréquence augmente, le détail de la stratification apparaît tant dans la partie à réponse stratifiée (S) correspondant à des sédiments silto-vaseux, que dans la zone à réponse chaotique légèrement stratifiée (C.S) attribuable à des niveaux alternés grossiers et fins, que les profils à basse fréquence transcrivaient comme un « bed-rock ».

Il n'est cependant pas nécessaire de passer par tous ces stades de rejeu ; les fréquences peuvent être regroupées en deux ensembles encadrant la fréquence moyenne du signal sismique : les hautes et les basses fréquences, dont l'intérêt lithosismique est illustré par quelques exemples.

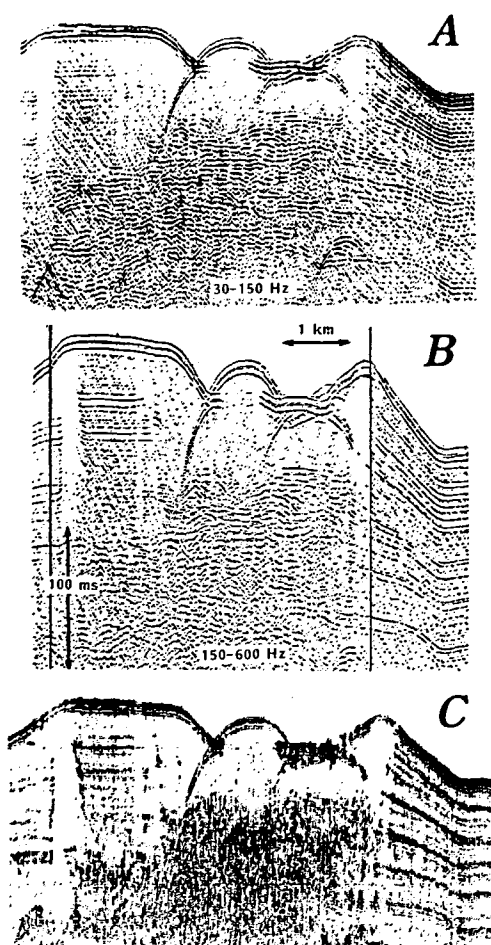


Figure 12  
Variations des réponses acoustiques chaotiques et stratifiées d'un lobe de l'éventail profond du Rhône en basses (A) moyennes (B) et hautes (C) fréquences (Sparker 3000 J).

Variations of the chaotic and stratified facies from a lobe of the Rhône deep-sea fan (3000 J. Sparker).

A: Low frequencies; B: Medium frequencies; C: High frequencies.

### Apport du filtrage dans les gammes de haute fréquence

#### Mise en évidence de la stratification

— A l'échelle de la série sédimentaire, les hautes fréquences accentuent la différenciation entre séquences de forte et faible amplitude (fig. 12 C), dont l'alternance est interprétée comme marquant des stades successifs de sédimentation (Bouye, 1984); ces alternances sont en effet constantes sur de grandes étendues de la marge rhodanienne (Got *et al.*, 1979; Canals-Artigas, 1985) et caractéristiques de la série sédimentaire du Quaternaire récent.

— A l'échelle de l'unité sédimentaire, le filtrage dans les fréquences élevées améliore la stratification relique des masses glissées des éventails sous-marins, et permet d'établir leur liaison avec les levées d'où sont initiés les glissements.

#### Mise en évidence de l'hétérogénéité du sédiment

La diminution de la longueur d'onde a pour conséquence de rapprocher celle-ci de la taille des hétérogénéités, entraînant une accentuation et une multiplication des phénomènes de diffraction. C'est le cas pour les faciès chaotiques des lobes d'éventails sous-marins (fig. 12 C) ou encore des phénomènes de « table » liés aux vases bulleuses prodeltaïques (fig. 13 A).

#### Accentuation des limites latérales

Elle est la conséquence de la différenciation des caractères propres de chaque faciès acoustique.

Il apparaît donc que le filtrage dans les hautes fréquences est d'un intérêt lithosismique majeur, puisqu'il favorise d'une part, la représentation des stratifications fines, et d'autre part, les variations latérales liées à des modifications texturales au sein des sédiments.

### Apport du filtrage dans les gammes de basses fréquences

Outre l'augmentation nette de la pénétration, l'intérêt des rejeux à basse fréquence réside essentiellement dans la reconnaissance des structures sédimentaires à l'échelle de la série et dans la détermination des relations géométriques au sein des diverses unités sédimentaires.

Les exemples illustratifs choisis sont les mêmes que précédemment :

— Les zones centrales des éventails sous-marins (fig. 12 A) révèlent une stratification à grande échelle qui se surimpose au faciès chaotique. Cette stratification surimposée se manifeste clairement sur les profils au canon à air (fig. 2 F), dont la fréquence d'émission est plus basse que celle du Sparker. La continuité des réflecteurs avec ceux des levées suggère un synchronisme de leur mise en place : turbidites chenalisées au centre et faciès de débordement sur les levées.

— Faciès de « table » : l'absorption et l'effet d'écran acoustique sont atténués (fig. 13 B), permettant d'observer la continuité des réflecteurs acoustiques et donc des unités sédimentaires.

### Conclusion

Chaque gamme de fréquence a son intérêt : l'une détaille et accentue les différences entre faciès acoustiques

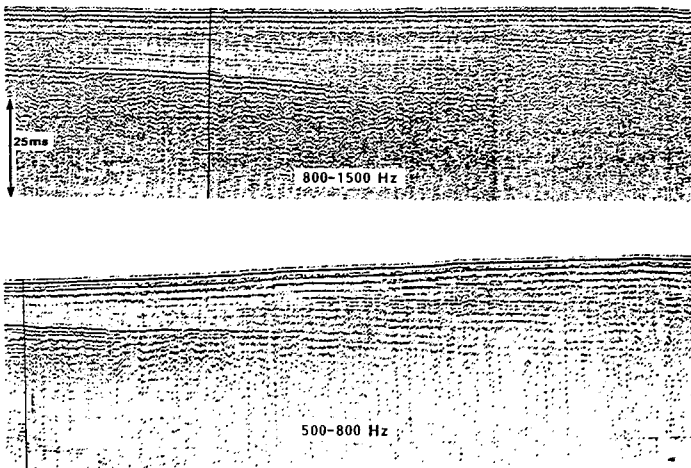


Figure 13

Variations du phénomène d'occultation de la réponse acoustique (faciès de table) dans des gammes de fréquences différentes (Surfboom 1000 j, plate-forme continentale de l'Ebre).

*Variations of the acoustic masking phenomenon in different frequency ranges (1000 j Surfboom profile from the Ebro continental shelf).*

ques, l'autre au contraire les atténue au bénéfice de la géométrie et des relations entre unités sismiques. Ces deux aspects sont déterminants dans l'analyse lithosismique, ce qui rend nécessaire la mise en œuvre de moyens techniques à large spectre de fréquence et le traitement de la réponse acoustique.

#### Problème des échelles d'observation

Le problème des échelles d'observation se pose à deux niveaux : la longueur des carottes par rapport à l'épaisseur du signal sismique d'une part et l'échelle sédimentologique par rapport à la résolution sismique d'autre part.

#### *Validité de la comparaison carottages-sismique*

La comparaison est établie sur la base d'une centaine de carottages et de plus de 3 500 km de profils sismiques. En ce qui concerne les carottages, les épaisseurs prélevées sont au maximum 10 m, mais le plus souvent les carottes ont des longueurs comprises entre 5 et 10 m. Dans le cas du Surfboom, la comparaison est directe, puisque les prélèvements dépassent le plus souvent l'épaisseur du signal (fig. 4 B, D, E).

Par contre, dans le cas du Sparker (fig. 4 A), et surtout de l'Air Gun (fig. 4 F) l'épaisseur du signal reste supérieure à la pénétration des carottages. La corrélation est donc soumise à l'hypothèse que la réponse acoustique immédiatement sous le signal du fond se poursuit jusqu'en surface. Dans la plupart des cas, cette hypothèse a été vérifiée par l'enregistrement simultané au sondeur de sédiment 3,5 kHz ou 12 kHz (fig. 10), bien qu'il subsiste toujours une incertitude dans les 2 premiers mètres.

Toutefois, des observations plus fines peuvent permettre de réduire cette hypothèse de continuité. Ainsi, le caractère de la réflexion du fond (amplitude, déformation du signal, hyperboles) peut fournir des indications sur la continuité de la réponse acoustique jusqu'à l'interface eau-sédiment (fig. 3 A). Dans certains cas où les horizons sous le signal ont un fort coefficient de réflexion, les réflecteurs peuvent même

traverser ce signal (fig. 4 C, F), permettant ainsi la corrélation de carottes de longueur inférieure à sa durée.

Malgré la différence d'échelle, la confrontation réponse sismique-carottage est dans le meilleur des cas directe, au pire comporte une incertitude qui peut localement être levée par l'observation détaillée du signal du fond.

#### *Caractères sédimentologiques et résolution sismique*

L'analyse lithosismique fait appel à des échelles d'observation très diverses, d'ordre kilométrique à millimétrique, voire micrométrique.

a) A l'échelle kilométrique, celle de la série sédimentaire, il y a adéquation entre le pouvoir de résolution sismique et l'ordre de grandeur des structures observées.

b) Aux échelles métriques à millimétriques, se pose le problème de la distorsion entre la résolution sismique plurimétrique et les paramètres sédimentologiques, d'ordre de grandeur inférieur au mètre. La transcription de l'un par l'autre s'opère par le jeu de deux phénomènes opposés :

— un phénomène d'intégration : la succession des interfaces vase-silt crée des réflexions qui interfèrent entre elles, augmentant l'amplitude et la fréquence apparente des réflexions enregistrées. Il se produit donc une intégration et une accentuation par la réponse acoustique, des discontinuités physiques dont l'espacement est très inférieur à la résolution du signal sismique.

Ce phénomène est particulièrement développé lorsque des lits présentent une épaisseur centimétrique et un espacement dans un facteur au moins égal à 10. En outre, il nécessite des différences d'impédance marquées, traduites par l'intervention des critères granulométriques. Ces conditions marquent les frontières d'existence des faciès stratifiés et transparents ;

— un phénomène d'occultation, principalement développé pour les alternances vases-silts, par interférence et annulation des ondes réfléchies pour des espacements plus réduits ou par amincissement des lits et affinement du matériel qui les constitue.

Cette notion d'échelle est donc en partie liée aux critères granulométriques et géométriques.

## CONCLUSION

La confrontation des réponses acoustiques en sismique haute résolution et des caractéristiques des sédiments meubles silto-vaseux récents prélevés dans les aires de développement des divers faciès acoustiques, permet de démontrer la validité de l'interprétation lithosismique.

Au travers de cette étude sur des milieux diversifiés, les corrélations lithosismiques apparaissent être de deux types : fiables et variables.

### Corrélations fiables

Elles se définissent comme correspondant à des réponses acoustiques bien différenciées, peu modifiées quelle que soit la technique opératoire, traduisant un type de sédiment bien défini par les spectres lithosismiques. Ces spectres, bien que ne pouvant être considérés comme universels, restent cependant valables dans les limites des gammes de fréquence (de 100 à 5000 Hz), de résolution (2 à 15 ms) et de puissance du matériel sismique mis en œuvre.

Les corrélations fiables concernent les faciès fruste, chaotique et stratifié ainsi que tous les faciès intermédiaires obéissant à des modifications granulométriques ou structurelles des sédiments.

### Corrélations variables

Deux cas sont à distinguer :

- Une réponse acoustique déterminée peut résulter de deux faciès lithologiquement différenciés; c'est le cas de la réponse transparente qui peut être associée, soit à des sédiments vaseux homogènes ou très finement stratifiés, soit à des ensembles remaniés, à faciès initialement stratifié.

- Un même sédiment peut se transcrire par des réponses distinctes, dépendant des caractéristiques techniques du matériel mis en œuvre, notamment sa fréquence d'émission. Les faciès d'écran acoustique sont une illustration de ces corrélations variables.

L'analyse lithosismique intègre donc des facteurs inhérents au sédiment, et d'autres dépendant des moyens techniques mis en œuvre. De ce fait, l'interprétation

doit se dérouler suivant un processus méthodologique strict comprenant :

- une analyse exhaustive du caractère de la réflexion, permettant de définir les faciès acoustiques;

- une étude détaillée des limites basales, sommitales et latérales, conduisant à la détermination des unités acoustiques et la restitution de leurs structures géométriques internes;

- une analyse comparative des divers caractères dans des gammes de fréquence différenciées.

Dans ces conditions, et malgré la différence des échelles d'observation, la sismique haute-résolution apparaît comme constituant un outil précieux pour le sédimentologue. L'analyse lithosismique permet, non seulement de restituer les grands traits granulométriques, structuraux et texturaux des sédiments (spectres lithosismiques), mais encore de reconstituer les domaines d'extension des faciès lithosismiques, qui peuvent différer de ceux de la cartographie acoustique. Sur ces bases pourront être déduites des conclusions sur la paléogéographie, dépassant ainsi le stade descriptif de la lithosismique.

## Remerciements

---

Les résultats exposés utilisent des données sismiques et de carottages obtenues au cours de nombreuses missions réalisées dans le cadre des programmes Profan et Deltarho du CEPM, d'un programme de recherche du Consejo Superior de Investigaciones Cientificas pour la plate-forme et le delta profond de l'Ebre, et d'un projet en collaboration avec l'École des Mines de Paris pour la retenue de Castillon.

Nous remercions tout particulièrement Monsieur F. Coumes, Ingénieur à la SNEA (P) à Pau, Messieurs Valéry et Orsolini (SNEA, Paris), Maldonado (Instituto Jaime Almera de Barcelone), Baudoin (École des Mines), Bellaiche (Station de géodynamique sous-marine de Villefranche-sur-Mer) pour leur concours scientifique et technique, ainsi que l'équipe technique de l'IUN de Naples.

## RÉFÉRENCES

- Aloisi J.-C., Monaco A., Thommeret J., Thommeret Y., 1975. Évolution paléogéographique du plateau continental languedocien dans le cadre du Golfe du Lion. Analyse comparée des données sismiques, sédimentologiques et radiométriques concernant le Quaternaire récent, *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, **2**, 17, 13-22.
- Aloisi J. C., Bellaïche G., Bouyé C., Droz L., Got H., Maldonado A., Mirabile L., Monaco A., 1981. L'éventail sous-marin profond du Rhône et les dépôts de pente de l'Ebre. Essai de comparaison morphologique et structurale, in: *Sedimentary basins of Mediterranean margins*, edited by F. C. Wezel, C.N.R. Italian Project of Oceanography, Technoprint, Bologna, 227-238.
- Anderson A. L., Hampton L. D., 1974. *In situ* measurement of sediment acoustic properties during coring, in: *Deep-sea sediments; physical and mechanical properties, tome 2*, edited by A. L. Inderbitzen, Plenum Press, New York and London, 497 p.
- Ballester A., Castelli J., Maldonado A., 1980. Présence de gaz méthane dans les sédiments prodeltaïques récents de l'Ebre, *XXVII<sup>e</sup> Réunion C.I.E.S.M., Cagliari*, Abst., 3 p.
- Biarrez J., Rudelle M., 1977. Étude de mécanique des sols en mer profonde, *Rapp. Int. CNEOX*.
- Bouyé C., 1984. *Étude des corrélations entre la réponse sismique haute-résolution de quelques types de dépôts meubles et leurs caractéristiques sédimentologiques*, Thèse Doct. 3<sup>e</sup> cycle, univ. Perpignan, 163 p.
- Canals-Artigas M., 1985. *Estructura sedimentaria y evolución morfológica de talud y del glacis continentales del Golfo de Leon: fenomenos de desestabilización de la cobertura sedimentaria plio-cuaternaria*, Thèse Univ. Barcelone, 618 p.
- Chassefière F., Got H., Leenhardt O., 1974. Comment aborder les travaux de reconnaissance des fonds sous-marins, *Geol. Tec.*, **1**, 16 p.
- Colantoni P., Fabbri A., Gallignani P., 1981. Seismic stratigraphic interpretation of high resolution profiles. Some applied examples, *Bull. Geol. Teor. Appl.*, **23**, 90-91, 89-106.
- Coutellier V., 1985. *Mise en évidence et rôle des mouvements gravitaires dans l'évolution de la marge continentale : exemple des marges du Golfe du Lion et de la Provence occidentale*, Thèse Doct. 3<sup>e</sup> cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris, 189 p.
- Got H., Aloisi J.-C., Leenhardt O., Monaco A., Serra-Raventos J., Theilen F., 1979. Structures sédimentaires sur les marges du Golfe du Lion et de Catalogne, *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, **1**, 4, 281-293.
- Got H., Aloisi J.-C., Monaco A., 1985. Sedimentary processes on deltas and shelves of the Mediterranean Sea, in: *Geological evolution of the Mediterranean basin*, edited by D. J. Stanley and F. C. Wezel, Springer-Verlag, 355-376.
- Hamilton E. L., 1970. Prediction of *in situ* acoustic and clastic properties of marine sediments, *Geophysics*, **36**, 2, 266-284.
- Hamilton E. L., 1974. Sound velocity and related properties of marine sediments North Pacific, *J. Geophys. Res.*, **75**, 23, 4423-4446.
- Hamilton E. L., 1976. Variations of density and porosity with depth in deep-sea sediments, *J. Sedim. Petrol.*, **46**, 2, 280-300.
- Lacaze J., 1976. Projet FAGIS, *Rapp. Int. Soc. Nat. ELF-Aquitaine*.
- Leenhardt O., 1972. *Le sondage sismique continu*, Masson et Cie, Paris, 164 p.
- Longuemard J.-P., Duboul-Ravazet C., 1980. Influence de quelques caractères granulométriques des sédiments marins sur la valeur du coefficient de réflexion de l'interface mer-sédiment, *Acustica*, **47**, 1, 34-39.
- Mear Y., 1984. *Séquences et unités sédimentaires du glacis rhodanien (Méditerranée occidentale)*, Thèse Doct. 3<sup>e</sup> cycle, univ. Perpignan, 214 p.
- Mitchum R.M., Vail P.R., Sangree J.B., 1977. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, in: *Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration*, edited by C. E. Payton, Am. Assoc. Petrol. Geologists Mem., **26**, 117-133.
- Mizikos J.-P., Mangin J.P., 1972. Les propriétés acoustiques des silt marins, *Rev. Inst. Fr. Pétrol.*, **27**, 1, 91-103.
- Ravenne C., 1978. Étude bibliographique des publications d'Exxon concernant l'interprétation stratigraphique des sections sismiques, *Rev. Inst. Fr. Pétrole*, **26**, 179 p.
- Ryan W.B.F., Stanley D.J., Hersey J.B., Fahlquist D.A., Allen T.D., 1970. The tectonic and geology of the Mediterranean, in: *The Sea*, edited by A. E. Maxwells, inter-science Pub., New York, 387-392.
- Schirmer F., Trad Fr. Leenhardt O., 1971. Étude des propriétés acoustiques des sédiments de la Mer du Nord et de la Baltique, *Thèse, univ. Hamburg*, Thomson C.S.F., *Rapport C.A.G.C.* 07/160.
- Seismic Stratigraphy. I: Application to hydrocarbon exploration 1977, edited by C. E. Payton, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, **26**, 516 p.
- Seismic Stratigraphy. II: Integrated approach, 1985, edited by O. R. Berg and D. W. Woolverton, *Am. Assoc. Petrol. Mem.*, **30**, 276 p.
- Sheriff R.F., 1977. Limitations on resolution of seismic reflection and geologic detail derivable from them, in: *Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration*, edited by C. E. Payton, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, **26**, 3-14.
- Shumway G., 1960. Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method, *Geophysics*, **25**, 3, 659-682.
- Siddiquie H.N., Gopala Rao D., Vora K.H., Topgi R.S., 1981. Acoustic masking in sediments due to gases on the western continental shelf of India, *Mar. Geol.*, **39**, 27-37.
- Stuart C.J., Caughey C. A., 1977. Seismic facies and sedimentology of terrigenous pleistocene deposits in Northwest and Central Gulf of Mexico, in: *Seismic stratigraphy - Applications to hydrocarbon exploration*, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, **26**.